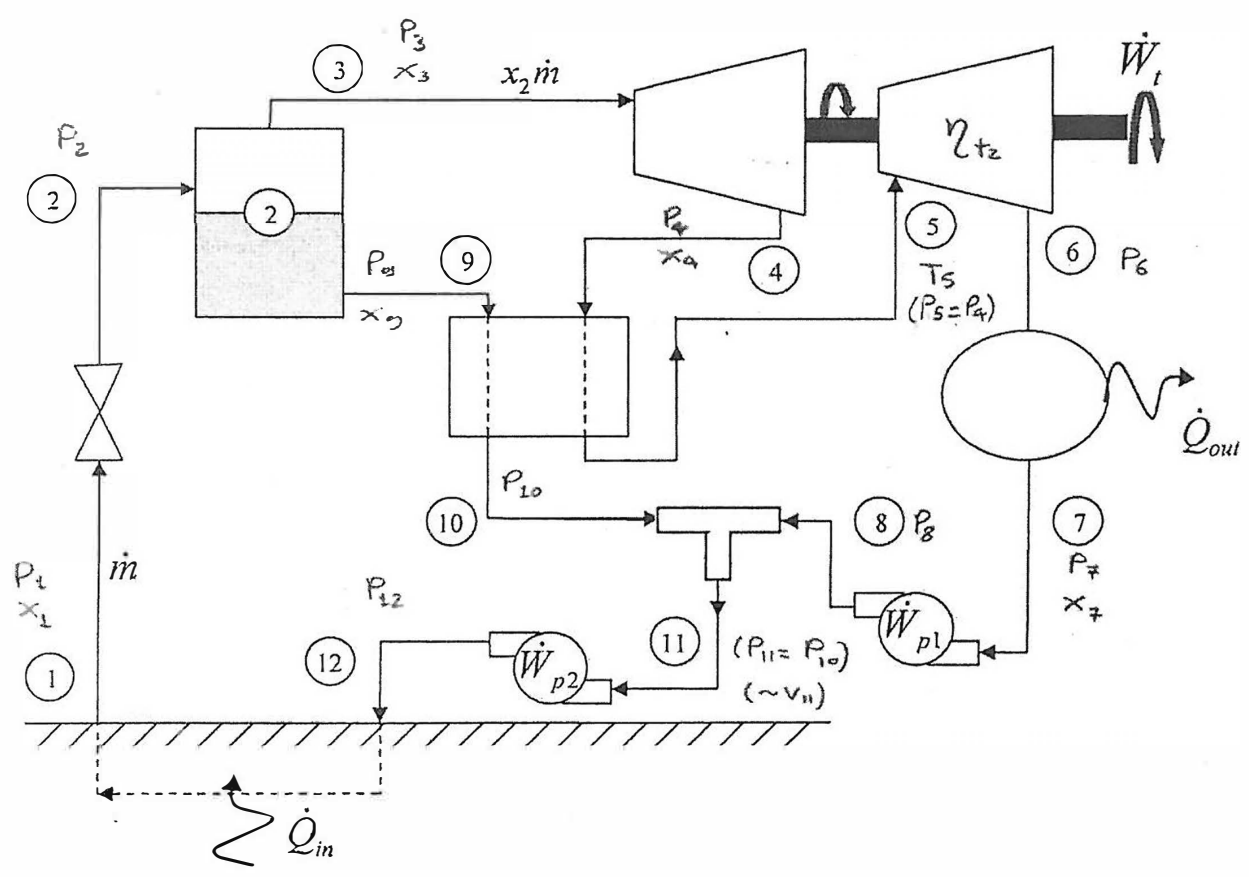


**MEC1210 Automne 2024, TD5 Groupe 2: Problème à faire en classe (solutionnaire)**



$P_1 = 16 \text{ MPa}$   
 $x_1 = 0 \text{ (liq. sat.)}$   
 $P_2 = 9 \text{ MPa}$   
 $P_3 = 9 \text{ MPa}$   
 $x_3 = 1 \text{ (vap. sat.)}$   
 $P_4 = 3 \text{ MPa}$   
 $x_4 = 0.90$   
 $T_5 = 300^\circ\text{C}$   
 $P_6 = 10 \text{ kPa}$   
 $P_7 = 10 \text{ kPa}$   
 $x_7 = 0 \text{ (liq. sat.)}$   
 $P_8 = 9 \text{ MPa}$

$P_9 = 9 \text{ MPa}$   
 $x_9 = 0$   
 $P_{10} = 9 \text{ MPa}$   
 $(v_{11} \approx 0.001233 \text{ m}^3/\text{kg})$   
 $P_{12} = 16 \text{ MPa}$

• pompes adiabatiques + réversibles  $\rightarrow$  isentropie  
 • régime permanent  
 • échangeur de chaleur bien isolé thermiquement  
 • turbines, valves, mélangeur adiabatiques  
 • négliger perte de P à travers l'échangeur de chaleur ( $P_5 = P_4$ ), le mélangeur ( $P_{11} = P_{10} = P_8$ ) et le condenseur ( $P_7 = P_6$ )  
 •  $\Delta e_c, \Delta e_p \approx 0$   
 supposition additionnelle : aucune

$\dot{m}_1 = 600 \text{ kg/s}$   
 $\eta_{t2} = 0.70$

a)  $h$ , phase et  $x$   
 b)  $\dot{W}_{net}$ ,  $\eta = ?$   
 c) diagramme T-s

a) état ① :  $P_1 = 16 \text{ MPa}$  }  $h_1 = h_f @ 16000 \text{ kPa} \stackrel{\text{A-5}}{=} \boxed{1649,9 \text{ kJ/kg}}$  (liquide saturé)  
 $x_1 = 0$

état ② :  $P_2 = 9 \text{ MPa}$  }  $h_2 = h_1 = \boxed{1649,9 \text{ kJ/kg}}$  (bilan d'énergie sur valve adiabatique)  
 phase?  $\Rightarrow$  A-4: pour  $P_{\text{sat}} = 9000 \text{ kPa}$   
 $h_f = 1363,7 \text{ kJ/kg}$   
 $h_g = 2742,9 \text{ kJ/kg}$   
 $h_f < h_2 < h_g \rightarrow$  mélange saturé

$$x_2 = \frac{h_2 - h_f}{h_g - h_f} = \frac{1649,9 - 1363,7}{2742,9 - 1363,7} = \boxed{0,2075}$$

état ③ :  $P_3 = 9 \text{ MPa}$  }  $h_3 = h_g @ 9000 \text{ kPa} \stackrel{\text{A-5}}{=} \boxed{2742,9 \text{ kJ/kg}}$  (vapeur saturée)  
 $x_3 = 1$

état ④ :  $P_4 = 3 \text{ MPa}$  }  $h_4 = h_f + x_4 h_{fg} \rightarrow$  A-5: pour  $P_{\text{sat}} = 3000 \text{ kPa}$   
 $x_4 = 0,90$  }  $\boxed{\text{mélange saturé}}$   
 $h_f = 1008,3 \text{ kJ/kg}$   
 $h_{fg} = 1794,9 \text{ kJ/kg}$   
 $h_4 = 1008,3 + (0,90)(1794,9) = \boxed{2623,71 \text{ kJ/kg}}$

état ⑤ :  $P_5 = P_4 = 3 \text{ MPa}$  }  $T_5 > T_{\text{sat}} @ 3000 \text{ kPa} = 233,85^\circ\text{C} \rightarrow$   $\boxed{\text{vapeur surchauffée}}$   
 $T_5 = 300^\circ\text{C}$  } A-6:  $\boxed{h_5 = 2994,3 \text{ kJ/kg}}$  ( $s_6 = 6,5412 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ )

état ⑥ :  $P_6 = 10 \text{ kPa} \Rightarrow$   $\eta_{t2} = \frac{\dot{W}_{t2}}{\dot{W}_{t2, \text{isen}}} = \frac{\cancel{m_5} (h_5 - h_6)}{\cancel{m_5} (h_5 - h_{6s})} = \frac{h_5 - h_6}{h_5 - h_{6s}}$   
 $\eta_{t2} = 0,70$

$$h_6 = h_5 - \eta_{t2} (h_5 - h_{6s})$$

$$\Rightarrow h_{6s} = ? : P_{6s} = P_6 = 10 \text{ kPa}$$

$$s_{6s} = s_5 = 6,5412 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

$$s_{f@10\text{kPa}} < s_{6s} < s_{g@10\text{kPa}}$$

$$\left( 0,6492 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \right) \quad \left( 8,1488 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \right)$$

mélange saturé

$$x_{6s} = \frac{s_{6s} - s_f}{s_g - s_f} = \frac{6,5412 - 0,6492}{8,1488 - 0,6492} = 0,785$$

$$h_{6s} = h_{f@10kPa} + x_{6s} h_{fg@10kPa}$$

$$h_{6s} = 191.81 + (0.78564)(2392.1) = 2071.14 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_6 = 2594.3 - 0.70(2594.3 - 2071.14)$$

$$h_6 = 2348.09 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_{f@10kPa} < h_6 < h_{g@10kPa} \rightarrow \text{mélange saturé}$$

(191.81 kJ/kg) (2583.9 kJ/kg)

$$x_6 = \frac{h_6 - h_f}{h_g - h_f} = \frac{2348.09 - 191.81}{2583.9 - 191.81} = 0.9014$$

état ⑦ :  $P_7 = 10 kPa$   
 $x_7 = 0$

$$h_7 = h_{f@10kPa} = 191.81 \frac{kJ}{kg} \quad (\text{liquide saturé})$$

$$(v_7 = v_{f@10kPa} = 0.001010 m^3/kg)$$

état ⑧ :  $P_8 = 9 MPa$   
 $s_8 = s_7$

$$\dot{W}_{P2} = \dot{m}_7 (h_8 - h_7) = \dot{m}_7 \int_{P_7}^{P_8} v dp \approx \dot{m}_7 v_7 (P_8 - P_7)$$

$$h_8 \approx h_7 + v_7 (P_8 - P_7)$$

$$\approx 191.81 \frac{kJ}{kg} + (0.001010 \frac{m^3}{kg})(9000 - 10) kPa \times \frac{kJ}{kPa \cdot m^3}$$

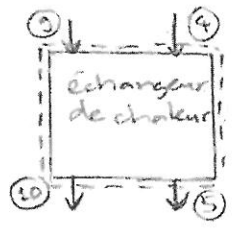
$$h_8 \approx 200.99 \frac{kJ}{kg} \rightarrow h_8 < h_{f@9000kPa} = 1363.7 \frac{kJ}{kg}$$

liquide comprimé

état ⑨ :  $P_9 = 9 MPa$   
 $x_9 = 0$

$$h_9 = h_{f@9000kPa} = 1363.7 \frac{kJ}{kg} \quad (\text{liquide saturé})$$

état ⑩ :  $P_{10} = 9 MPa$   
 $h_{10} = ?$



conservation de masse : sans mélange

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 = x_2 \dot{m}$$

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10} = (1 - x_2) \dot{m}$$

bilan d'énergie :  $\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$

$$x_2 \dot{m} h_4 + (1 - x_2) \dot{m} h_9 = x_2 \dot{m} h_5 + (1 - x_2) \dot{m} h_{10}$$

$$h_{10} = h_g - \frac{x_2}{1-x_2} (h_5 - h_4)$$

$$= 1363.7 - \frac{(0.2075)}{1-(0.2075)} (2994.3 - 2623.71)$$

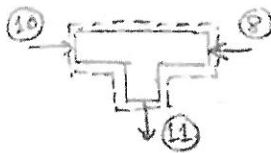
$$h_{10} = 1266.67 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{10} < h_{f@9000 \text{ kPa}} = 1363.7$$

liquide comprimé

état (11) :  $P_{11} = P_{10} = P_2 = 9 \text{ MPa}$

$$h_{11} = ?$$



conservation de masse :  $\dot{m}_{11} = \dot{m}_2 + \dot{m}_{10}$

$$= x_2 \dot{m} + (1-x_2) \dot{m}$$

$$\dot{m}_{11} = \dot{m}$$

bilan d'énergie :  $\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$

$$(1-x_2) \dot{m} h_{10} + x_2 \dot{m} h_g = \dot{m} h_{11}$$

$$h_{11} = x_2 h_g + (1-x_2) h_{10}$$

$$h_{11} = (0.2075)(200.89) + (1-0.2075)(1266.67)$$

$$h_{11} = 1045.52 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\rightarrow h_{11} < h_{f@9000 \text{ kPa}}$$

liquide comprimé

Note:  $v_{11}$  donné est une valeur approximative pour trouver  $h_{12}$  via le travail de la pompe. Il ne faut donc pas l'utiliser pour trouver  $h_{11}$ . En principe, à partir de  $P_{11}$  &  $h_{11}$ , on peut trouver  $v_{11}$ .

état (12) :  $P_{12} = 16 \text{ MPa}$   
 $s_{12} = s_{11}$

$$\dot{W}_{P2} = \dot{m}_{12} (h_{12} - h_{11}) = \dot{m}_{12} \int_{P_{11}}^{P_{12}} v_{\text{est.}} dP \approx \dot{m}_{12} v_{11} (P_{12} - P_{11})$$

$$h_{12} \approx h_{11} + v_{11} (P_{12} - P_{11})$$

$$\approx 1045.52 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + (0.001233 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}) (16000 - 9000) \text{ kPa} \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kPa} \cdot \text{m}^3}$$

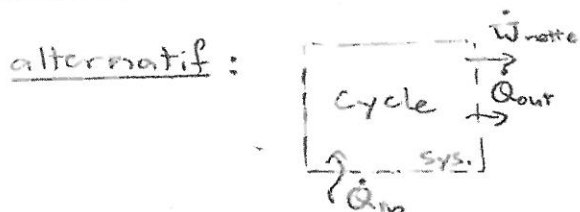
$$h_{12} \approx 1054.15 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\rightarrow h_{12} < h_{f@16000 \text{ kPa}} = 1649.9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

liquide comprimé

$$\begin{aligned}
 b) \dot{W}_{\text{nette}} &= \dot{W}_{T1} + \dot{W}_{T2} - \dot{W}_{P1} - \dot{W}_{P2} \\
 &= x_2 \dot{m} (h_3 - h_4) + x_2 \dot{m} (h_5 - h_6) - x_2 \dot{m} (h_8 - h_7) - \dot{m} (h_{12} - h_1) \\
 &= \dot{m} [x_2 (h_3 - h_4 + h_5 - h_6 + h_7 - h_8) - (h_{12} - h_1)] \\
 &= (600 \frac{\text{kg}}{\text{s}}) [(0.2075) (2742.9 - 2623.71 + 2994.3 - 2348.09 + 191.81 \\
 &\quad - 200.89) - (1054.15 - 1045.52)]
 \end{aligned}$$

$$\dot{W}_{\text{nette}} = 88983.8 \text{ kW} = 88.9838 \text{ MW}$$



bilan d'énergie sur système fermé (cycle) donne

$$\begin{aligned}
 \dot{W}_{\text{nette}} &= \dot{Q}_{\text{in}} - \dot{Q}_{\text{out}} \\
 &= \dot{m} (h_1 - h_{12}) - x_2 \dot{m} (h_6 - h_7)
 \end{aligned}$$

$$\dot{W}_{\text{nette}} = 88983.1 \text{ kW} \longrightarrow$$

Note: petite différence à cause des arrondissements dans les calculs de  $x_2$  et des enthalpies

$$\text{ii) } \eta = \frac{\dot{W}_{\text{nette}}}{\dot{Q}_{\text{in}}} = \frac{\dot{W}_{\text{nette}}}{\dot{m} (h_1 - h_{12})} = \frac{88983.8 \text{ kW}}{(600 \frac{\text{kg}}{\text{s}}) (1649.9 - 1054.15) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}$$

$$\eta = 0.24894$$

$$\text{alternatif; } \eta = \frac{\dot{W}_{\text{nette}}}{\dot{Q}_{\text{in}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{in}} - \dot{Q}_{\text{out}}}{\dot{Q}_{\text{in}}} = 1 - \frac{\dot{Q}_{\text{out}}}{\dot{Q}_{\text{in}}} = 1 - \frac{x_2 \dot{m} (h_6 - h_7)}{\dot{m} (h_1 - h_{12})}$$

$$\eta = 0.24897$$

c) diagramme T-s :

